

调水工程规划设计的核心原则与实践应用

贾楠

中国南水北调集团有限公司, 中国·北京 100036

摘要: 调水工程是优化水资源空间配置、缓解区域水资源供需矛盾、保障经济社会高质量发展与生态安全的战略性基础设施, 其规划设计的科学性、合理性将直接决定工程效益的发挥与长期可持续运行。本文针对水资源高效利用与生态保护协同发展的核心目标, 系统分析调水工程规划设计的核心原则, 其中包括水资源优化配置、生态优化与绿色发展、因地制宜与技术可行、经济合理与效益统筹、协同共治与长效保障五大核心导向。研究表明, 调水工程规划设计需要始终坚守多原则协同共生, 平衡水资源开发利用与生态环境保护、区域发展与跨流域协调、短期效益与长期可持续的关系, 希望本文的分析可以为我国后续调水工程的科学规划、规范设计提供参考与依据。

关键词: 调水工程; 规划设计; 水资源; 生态系统平衡

Core Principles and Practical Applications of Water Diversion Project Planning and Design

Jia Nan

CHINA SOUTH-TO-NORTH WATER DIVERSION CORPORATION LIMITED, China Beijing 100036

Abstract: Water diversion projects are strategic infrastructure for optimizing the spatial allocation of water resources, alleviating regional water supply-demand conflicts, and ensuring high-quality economic and social development as well as ecological security. The scientific and rational planning and design of these projects directly determine their effectiveness and long-term sustainable operation. This paper systematically analyzes the core principles of water diversion project planning and design, focusing on the goal of synergistic development between efficient water resource utilization and ecological conservation. These principles include five key orientations: optimal water resource allocation, ecological optimization and green development, adaptation to local conditions and technical feasibility, economic rationality and benefit coordination, and collaborative governance with long-term safeguards. The study demonstrates that water diversion project planning and design must consistently uphold the coexistence of multiple principles, balancing the relationship between water resource development and ecological protection, regional development and cross-basin coordination, as well as short-term benefits and long-term sustainability. It is hoped that this analysis will provide references and foundations for the scientific planning and standardized design of future water diversion projects in China.

Keywords: Water diversion project; Planning and design; Water resources; Ecosystem balance

0 引言

调水工程作为跨领域、跨区域优化水资源配置的核心方式, 通过人工输水设施将水资源从富集区域调配到短缺区域, 将弥补水资源空间分布与需求错位的缺陷, 缓解缺水区域供需矛盾, 保障城乡供水安全、粮食安全与生态安全, 推动区域协调发展。自从 20 世纪以来, 国内外相继建成了一批重大调水工程, 如我国南水北调东中线工程、引黄济青工程, 国外则是包括美国中央河谷调水工程、以色列北水南调工程等。此类工程均在实践的过程中发挥出经济、社会、生态效益, 但是同时也展现出一些工程由于规划设计不完善、原则践行不到位, 因此导致的生态破坏、水资源浪费、区域协调不畅等问题, 由此可见调水工程

规划设计的科学性与严谨性, 将会对大部分地区产生重大影响。

1 调水工程规划设计的核心原则

1.1 水资源优化配置原则

水资源优化配置作为调水工程规划设计的核心前提, 主要目的在于达成“以需定供、供需平衡、高效利用”, 通过对水资源统筹, 从而解决水资源空间分布不均与区域需求错位的问题。规划设计首先需要全方面勘察水资源的禀赋、水质情况以及可调配量, 同步调研受水区域城乡生活、工农业生产、生态环境以及各类用水需求, 明确水资源供需目前的缺口与供水优先级。优化配置期间, 需要始终坚持“先节水后调水、先治污后通水、先环保后用水”

的理念,在保障城乡居民生活用水这一刚性需求之后,再考虑当地农业灌溉需求、工业生产需求,预留生态环境最小需水量,避免水资源浪费与错配。优化输水线路与调度方案,减少输水过程中产生的损耗量,推动水源地与受水区水资源协同利用,从时间、空间、用途三方面对水资源进行最佳配置,发挥出调水工程的水资源调配作用^[1]。

1.2 生态优化与绿色发展原则

生态优化与绿色发展作为调水工程规划设计的底线需求,核心在于达成工程建设与生态环境保护两者的协调,避免将破坏生态环境作为代价来换取水资源。水资源规划设计需要提前进行全方位的生态环境影响评价分析,识别当地的水源地、输水线路沿线以及受水区的生态敏感区、脆弱区,避开自然保护区、生态公园、湿地公园、珍稀物种栖息地等区域,尽量降低工程建设对于地表植被、土壤、水文情势以及生物多样性造成的负面影响。在工程设计期间,融入生态保护措施,打造出生态流量下泄通道、鱼类洄游设施,通过环保型的施工工艺与材料,降低施工扬尘、噪声,减少水资源输送对周边生态环境产生的破坏。同步规划工程建设完成之后的生态修复计划,对于施工产生扰动的区域进行植被恢复、水土保持治理,加强水源地水质保护与受水区生态涵养,推动调水工程与生态环境良性循环,落实绿色发展理念^[2]。

1.3 因地制宜与技术可行原则

调水工程在规划设计期间,需要始终坚守因地制宜与技术可行原则,考虑技术先进性与可靠性,保障工程建设的可行性、安全性、完善性。对于调水工程的规划设计,需要关注水源地与受水地不同的地形地貌、地质条件、气候特征等不同的自然因素,考虑到区域经济社会的发展状态,进而制定出具备差异化的工程方案。在山区,可以优先使用隧洞输水的方式,平原地区则是优先考虑渠道或者管道输水,避免盲目照搬其他的工程模式。在技术型号选择方面,优先使用成熟、可靠、节能、环保的核心技术,例如搭配高效率防渗技术、智能调度技术、水质监测技术等,重视技术的先进性与经济性,避免使用一些不成熟、高风险的技术。同时,结合工程规模与难度情况,对施工工艺和施工周期进行分析,关注工程建设期间需要面临的技术瓶颈与施工风险,打造出针对性改善措施,保障工程建设与区域实际情况衔接,落实技术方案,保障工程的长期稳定开展^[3]。

1.4 经济合理与效益统筹原则

经济合理与效益统筹原则,本质上在于保障调水工程

的投入与产出平衡,不仅关注生态效益,也能够满足经济效益的需求,让调水工程拥有多元效益。规划设计需要关注工程建设的整体成本,其中包括建设成本、运营成本、管理成本,同时水源地周边的保护、输水设施日后的养护、水质的处理,此类费用也属于成本考量的一部分。在考虑成本之后,对工程设计方案进行优化改进,控制成本投入量,尤其是需要避免盲目追求调水工程规模而产生的资金浪费问题。通过兼顾经济、社会、生态三大效益,经济效益方面,关注工程对于受水区工农业发展情况以及工程对于当地产业升级产生的带动作用,降低缺水而造成的经济损失。社会效益方面,需要考虑供水工程对当地用水安全的保障以及对城乡居民生活质量产生的提升效果。生态效益方面,注重水资源补充对于生态环境改善产生的积极效益,尤其是一些缺水生态环境通过调水工程产生的生态变化。通过打造出科学的效益分配与成本分担机制,协调水源地与受水区、不同区域、不同群体之间的利益关系,保障工程效益最大化,达成调水工程的经济合理、多方共赢发展^[4]。

1.5 协同共治与长效保障原则

协同共治与长效保障原则也是调水工程长期发挥应有效能的关键,核心在于打造出“多方协同、权责明确、监管有力、运维高效”的长效运转机制。调水工程包括水源地、输水沿线、受水区等多个区域,不仅仅是水利工程的单独责任,同时也包括环保、发改、住建等多个部门,因此规划设计需要明确各方承担的权责,建立起跨区域、跨部门协同共治机制体系,提升沟通协调效果,进而解决区域之间利益冲突、权责交叉的问题。同步完善水资源调度工作机制,结合来水情况与用水需求,打造出科学合理的年度、季度调度方案,实现精准调度与处理。通过打造健全的水质监测、水量计量、安全监管体系,实现从水源地到受水区的全流程监测分析,排查安全隐患。除此之外,完善政策保障、资金保障、技术保障、人才保障体系,明确工程运维期间的责任主体划分,确保调水工程建成之后可以长期运行,发挥出水资源调控与保障的作用。

2 调水工程规划设计难点

2.1 水资源供需与生态约束的平衡难点

调水工程规划设计的首要难点在于统筹水资源供需平衡以及生态环境对水资源的刚性约束。两者的矛盾贯穿于设计的整个流程,同时很难准确把控。一方面,水资源供需测算存在较强的不稳定性,来水量往往受气候变迁、极端天气所影响,很难准确评估稳定调配量。受水区的工农

业用水、城乡生活用水需求则是随着当地社会环境的发展与经济环境的变化而变化,供需缺口测算很难保障准确,如果调配量不足,将很难解决受水区缺水的问题,过量调配又会产生水资源浪费。另一方面,生态保护刚性约束导致平衡难度增加,水源地需要预留出足够的生态流量保障流域生态环境的稳定性,输水线路需要避开生态敏感区,受水区水资源补给之后需要避免土壤陷入盐碱化当中,此类次生生态问题成为调水工程的难点^[5]。

2.2 复杂地质地形与技术适配的攻坚难点

调水工程跨越不同地区、地形地貌、地质条件非常复杂,因此调水工程设计与技术选型面临巨大挑战,这也是规划设计期间的重点攻坚难点。多数调水工程需要穿越山区、平原、河谷等多种地形环境,山区区域容易在施工期间出现断层、岩溶、滑坡等不良地质环境,施工期间隧洞施工、边坡施工的难度较高,容易因此出现地质灾害问题。平原地区的地下水位较高、土壤渗透性较强,容易出现输水渗漏、渠道淤积等问题,对于防渗技术提出了更高要求。同时,技术适配性很难兼顾使用需求,不同地形、地质条件下,输水方式的选择需要考虑到成本、效率、安全等多方面需求。核心技术的选择需要考虑到平衡性与可靠性,如果技术选择不当,可能会导致工程建设与运维成本增加,在此类影响下,核心技术选择越发困难。

2.3 跨区域协同与长效运维的统筹难点

调水工程大多数属于跨流域、跨行政建设,涉及多方利益主体与多个管理部门,跨区域协同与长效运维的统筹管控作为规划设计期间的突出难点问题。一方面,利益协调难度较大,水源地与受水区的利益诉求存在一定差异,水源地需要承担起水资源保护、生态修复的成本,但是工程对于水源地起到的效益往往微乎其微。受水区关注用水保护,对供水成本、供水稳定性的要求比较高,自身无需进行过度干预,但是可以享受到工程的效益。另一方面,长效运维体系很难提前统筹规划,工程建成之后涉及水源保护、输水设施运维、水质监测、水量调度等诸多环节,需要明确跨区域、跨部门的权责划分管控,构建出完善的工程监管与运维机制。但是由于涉及的利益方较多,各方权责交叉、资金保障不足、技术运维水平不均衡,因此导致长效运维体系的规划设计很难覆盖与落实,直接影响工程长效效能的顺利发挥^[6]。

3 调水工程规划设计的实践策略

3.1 精准测算工序,打造生态协同保护的技术体系

对于水资源供需测算不确定性、生态约束与用水需求

平衡难度较大的核心难点问题,在实践过程中需要打造出“精准测算+生态适配+节水联动”的综合技术方案,结合公开数据提升规划设计的科学性。在水资源供需测算的过程中,使用分布式水文模型结合长系列水文数据,包括供水地与受水区近 30 年实测的径流数据、降水数据,模型可以选择 SWAT 模型,进而精准核算水源地可调裴亮。例如,南水北调中线工程规划的过程中,工程规划人员通过分析丹江口水库在 1956—2000 年的实测径流数据,从而确定多年平均可调配水量为 95 亿 m^3 ,保障当地的供水稳定性。另外,使用大数据技术分析受水区的用水需求情况,结合当地 GDP 增速、产业结构调整趋势,打造出用水需求的预测模型,将误差控制在 5% 之内。在生态协同保护方面,使用生态流量动态调控处理技术,根据水源地流域的生态需水定额情况,设置生态泄水闸与实时监测站点,保障生态流量下泄达标率 $\geq 98\%$,例如丹江口水库要求最小生态流量不低于 $200\text{m}^3/\text{s}$ 。受水区则可以考虑推动农田节水灌溉技术,将灌溉水利用系数从 0.55 提升到 0.75 以上,减少水资源消耗量,配套土壤盐碱化的防控工程,使用暗管排水技术,将土壤含盐量控制在安全范围内,一般为 0.3% 以下,改善生态与供需平衡的难点。

3.2 强化地质勘察,优化复杂工况下的技术适配方案

对于复杂地质地形适配困难、技术选型不够合理的问题,实践过程中需要将“精准勘察+差异化技术适配+质量管控”作为核心目标,在其中融入具体的技术参数与数据指标,提升工程设计的可行性与完善性。首先,进行精细化地质勘察分析,通过无人机航测、地质雷达探测、钻孔 CT 等综合技术模式,对输水线路进行全方位勘察分析,使用综合技术进行分析,可以保障勘察精度达到 90% 以上,提前识别不良地质环境的区域。例如,引汉济渭工程秦岭输水松洞,通过超前的地质预报技术,探明断层 127 条,为隧洞设计提供支撑与帮助。其次,推动差异化的输水技术适配管理,山区区域可以使用全断面的硬岩掘进机进行施工,掘进技术可以达到 3—5m/d,相较于传统的钻爆法技术效率提升 40% 以上,使用喷锚支护技术,支护强度在 30MPa 以上,有效防范地质灾害问题。平原区域可以使用 HDPE 防渗管道输水处理,防渗系数 $\leq 1 \times 10^{-11}\text{m/s}$,将输水的渗漏损失始终控制在 3% 之内,相较于传统渠道渗漏损失大幅度降低,传统渠道可能会造成 15 左右的渗漏。除此之外,还需要打造出技术质量管控工作体系,通过使用 BIM 技术对工程设计开展可视化模拟分析,提前排查技术适配的隐患问

题,同步引用《调水工程设计原则》(SL267-2001 标准),对于防渗、衬砌等关键技术参数进行严格的监督管控。例如渠道衬砌使用 C30 混凝土,保证厚度在 20cm 以上,并且抗冻等级达到 F200,确保工程可以长期、安全、稳定运行,改善复杂地质技术适配的难题。

3.3 健全协同机制,构建全生命周期长效运维机制

对于跨区域协同困难、长效运维体系不够完善的问题,在实践的过程中将“机制创新+技术赋能+资金保障”作为策略方式,通过结合具体的数据与案例,推动调水工程的实践落地。在跨区域协同方面,打造出跨行政区域调水协同管理委员会,明确水源地与受水区的权责范围,推动“成本分担+效益共享”的处理机制。例如,南水北调中线工程当中,按照“谁受益、谁承担”的基本原则,打造出合理的供水价格,一般居民用水为 2.5 元/m³、工业用水 3.8 元/m³,凭借这一收费方式,南水北调中线工程累计筹集运维资金超过 500 亿元,其中受水区承担 70%、水源地承担 30%,有效协调双方利益。同时,构建出跨区域智能调度平台,其中集成水量、水质、水文等实时监测数据,监测点位达 1200 余个,数据传输延迟≤10s,达成水源地来水、受水区用水的准确调度,调度成功率高达 99%。在长效运维方面,构建出全生命周期运维模式,在工程规划阶段同步设计出运维方案,搭配智能化的运维设备。例如,使用机器人巡检输水管道,巡检效率提升 60%以上,运维人员减少 40%。打造水质常态化监测处理体系,使用在线监测与人工检测结合的方式,每个月进行 1 次全指标检测,保障水质达标率稳定处于 95% 以上。除此之外,完善资金与人才保障,每年投入运维资金进行运维处理,培养专业的运维人才,打造运维责任主体,通过这一方式达成工程长期稳定运行,发挥出调水工程的效益与价值。

4 结语

调水工程设计作为一项兼具复杂性、系统性与长期性的系统工程,不仅需要坚守核心原则不偏离,使用原则引领工程设计的正确方向,进而平衡水资源开发与生态保护、区域利益与全局发展、短期效益与长期可持续的关系。同时,直面规划设计期间的各类观点,依据技术创新与机制完善,准确施策、攻坚克难,进而保障工程设计可以贴合实际需求,保障科学可行性。同时还需要强化实践策略的落地执行,将技术性、科学性、合理性贯穿于工程的选址、线路布局、技术选型、运维保障等不同关键环节。只有通过多方面的调控与处理,才可以让调水工程真正成为改善水资源分布不均、保障水安全、赋能生态保护与区域协调发展的支撑,为我国生态文明建设与高质量发展注入更加持久的水资源动力。

参考文献:

- [1] 王禹. 引调水工程对区域水资源优化配置的影响及其可持续发展研究[J]. 中国资源综合利用, 2025,43(05): 150-152.
- [2] 伍渭城, 陈光伟, 罗浩然等. 高州市石鼓镇农业调水工程规划与设计研究[J]. 乡村科技, 2025,16(05):150-154.
- [3] 李臻, 叶植滔, 邱冰等. 关于重大引调水工程分期建设原则的有关思考[J]. 水利规划与设计, 2025,(08):1-4+51.
- [4] 徐延春, 任大伟, 张璇等. 分散组团空间结构的城市给水工程规划策略研究[J]. 水利技术监督, 2024,(11): 93-96.
- [5] 彭祥. 南水北调工程总体规划前期论证历程总结、分析与评价[J]. 中国水利, 2024,(08):14-24+32.
- [6] 何君, 酆建强, 李云玲等. 新形势下科学推进我国调水工程规划建设的若干思考[J]. 中国水利, 2023,(22):49-53.